

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ

Чернышев Е.А., Волосенко К.С. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Аннотация. В статье выполнен теоретический анализ динамической устойчивости при точении. На основании эмпирических зависимостей для расчета сил резания предложен новый подход и определено влияние режимов резания на устойчивость.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, режимы резания, диссипация.

1. Введение

Динамическая устойчивость системы, в частности для обработки резанием, подразумевает такое ее свойство, что при сообщении системе любых возмущений они будут затухать с течением времени. Другое, усиленное толкование устойчивости можно свести к требованию, что вообще колебания системы должны затухать. Поэтому обеспечение устойчивости повысит качество обработки за счет стабилизации процесса резания и его характеристик. Вопрос устойчивости при резании исследовался многими авторами. Впервые он был поставлен А.И. Кашириным [1], впоследствии развит Кудиновым В.А. [2], М.Е. Эльясбергом [3], исследовался в работах А.П. Соколовского [4], И.И. Ильницкого [5], С.С. Кедрова [6], М.Л. Орликова [7] и др., причем в той или иной степени в любой литературе по динамике станков. Из публикаций последних лет упомянем работы Г.А. Оборского [8, 9], Ю.Г. Кабалдина [10] и то свойство, что для анализа устойчивости в последние годы все чаще привлекается математический аппарат нелинейной и хаотической динамики и синергетики. Тем не менее эта задача по-прежнему остается актуальной, поскольку существенных подвижек в физическом объяснении экспериментально наблюдаемых явлений при резании, по мнению автора, после 1960-х годов достигнуть не удалось. Нет этого и в настоящей работе, которая в большей степени представляет метод анализа устойчивости за счет более полного использования имеющихся эмпирических зависимостей для расчета сил резания.

Основная идея работы – оценивать влияние на устойчивость каждого из режимов резания на основании процентного вклада в формирование значения показателя, характеризующего устойчивость. В качестве такого показателя принимается критическое значение диссипации, ниже которого система переходит в неустойчивый режим. Иными словами, чем в большей степени фактор влияет на значение исследуемого показателя устойчивости, тем больше считается его влияние на устойчивость. Таким образом, **цель работы** – теоретическим путем количественно определить влияние режимов резания и их сочетаний на устойчивость динамической системы (ДС) при точении.

2. Основное содержание и результаты работы

Приведем основные физические допущения, принятые при создании математической модели.

1. Будем считать, что ДС состоит из двух приведенных масс – инструмента и заготовки, взаимодействующих между собой посредством процесса резания с силой, которую можно вычислить на основании соответствующей эмпирической зависимости. Необходимо допустить, что приведенные массы резца и заготовки содержат также часть массы жестко закрепленных с ними деталей: с одной стороны, резцедержателя и суппорта, с другой – шпинделя вместе с приспособлением.

2. Будем считать, что инструмент и заготовка могут совершать колебания в различных направлениях. Для инструмента пренебрежем угловыми перемещениями и положим, что его движение осуществляется в трех взаимно перпендикулярных поступательных перемещениях – тангенциальном, радиальном и осевом. Заготовку представим совершающей одновременно тангенциальные, радиальные и крутильные колебания, пренебрегая ее свойством балки и возможностью осевых колебаний. Таким образом, исследуемая ДС, схема которой приведена на рис. 1, всего имеет 6 степеней свободы. Введены следующие обозначения для малых колебательных перемещений: x - осевые, y - радиальные, z - тангенциальные, ψ - крутильные.

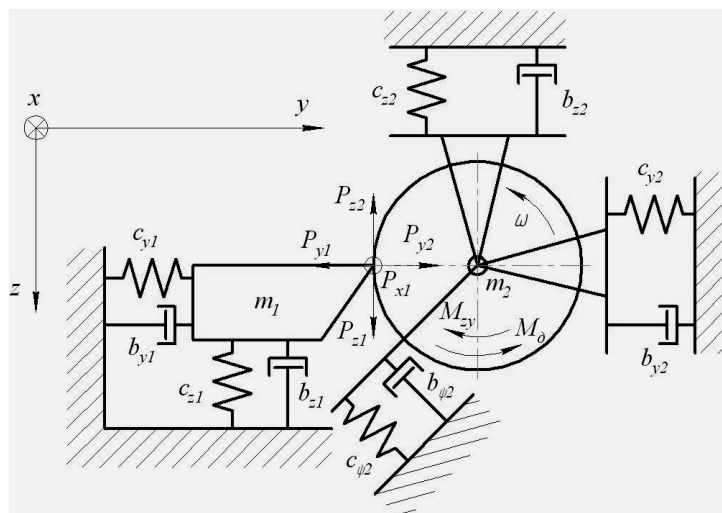


Рис. 1. Схема двухмассовой ДС при точении с шестью степенями свободы (степень свободы колебаний заготовки в осевом направлении не показана)

3. Будем считать справедливыми закон Гука и гипотезу внутреннего трения в виде линейных зависимостей для восстанавливающих сил и сил сопротивления с постоянными по величине коэффициентами пропорциональности, называемыми соответственно жесткостью и коэффициентом вязкого трения (диссипации).

4. Предположим, что составляющие силы резания описываются эмпирическими зависимостями [11], где фактические режимы резания корректируются соответствующими колебательными перемещениями и/или их скоростями, т.е. ДС является автономной. Впервые это предположение было выдвинуто А.И. Кашириным [1] и впоследствии поддержано, в частности, А.П. Соколовским [4], И.И. Ильницким [5], Б.В. Никитиным [12] и др. Вместе с тем во многих работах по динамике станков не дается прямого ответа на этот принципиальный, по мнению автора, вопрос – считается ли система явно зависящей от времени или нет.

5. Предположим, что все прочие параметры, характеризующие условия обработки (помимо режимов резания), не изменяются во времени.

Принимая во внимание принятые допущения, приступим к выводу уравнений движения ДС в соответствии с расчетной схемой на рис. 1. Приняты следующие обозначения: m_1 - приведенная масса инструмента, m_2 - приведенная масса заготовки; b, c - соответственно коэффициент вязкого трения и жесткость, индекс которых обозначает степень свободы инструмента или заготовки; P_z, P_y, P_x - соответственно тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания, добавление индекса 1 или 2 к которым означает их действие на соответствующую приведенную массу; M_ϕ - крутя-

ший момент, развиваемый двигателем; M_{zy} - крутящий момент тангенциальной и радиальной сил; R - радиус исходной заготовки; ω - номинальная угловая скорость вращения заготовки. Вращение против часовой стрелки будем считать положительным.

Сообразно принятым обозначениям, запишем в рамках сделанных допущений уравнения динамики исследуемой системы следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 + b_{z1} \dot{z}_1 + C_{z1} z_1 &= P_z, \\ m_1 \ddot{y}_1 + b_{y1} \dot{y}_1 + C_{y1} y_1 &= -P_y, \\ m_1 \ddot{x}_1 + b_{x1} \dot{x}_1 + C_{x1} x_1 &= -P_x, \\ m_2 \ddot{z}_2 + b_{z2} \dot{z}_2 + C_{z2} z_2 &= -P_z, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_{y2} \dot{y}_2 + C_{y2} y_2 &= P_y, \\ J_2 \ddot{\psi}_2 + b_{\varphi 2} \dot{\psi}_2 + C_{\varphi 2} \psi_2 &= M_{\partial} - M_{zy}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Определим силовые факторы в правой части (1). Составляющие силы резания, сообразно [11], запишем в виде

$$\begin{aligned} P_z &= k_z V^{l_z} s^{m_z} h^{n_z}, \\ P_y &= k_y V^{l_y} s^{m_y} h^{n_y}, \\ P_x &= k_x V^{l_x} s^{m_x} h^{n_x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где V, s, h - скорость, подача и глубина резания соответственно, а показатели степени l, m, n выбираются для каждой составляющей силы резания, что отражают индексы z, y, x . Коэффициенты k_z, k_y, k_x вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} k_z &= 10 C_{pz} K_p 60^{l_z} 1000^{m_z} 1000^{n_z}, \\ k_y &= 10 C_{py} K_p 60^{l_y} 1000^{m_y} 1000^{n_y}, \\ k_x &= 10 C_{px} K_p 60^{l_x} 1000^{m_x} 1000^{n_x}, \end{aligned} \quad (3)$$

обусловливая подстановку значений V, s, h в СИ. Коэффициенты C_{pz}, C_{py}, C_{px} выбираются по [11] для каждой составляющей силы резания.

Выразим фактические значения режимов резания через их номинальные значения и малые колебательные перемещения. Будем обозначать номинальные скорость резания, подачу и глубину через V_0, s_0, h_0 соответственно.

Фактическая подача корректируется осевыми перемещениями инструмента и радиальными перемещениями инструмента и заготовки:

$$s = s_0 + x_1 + (y_1 - y_2) \operatorname{ctg} \varphi, \quad (4)$$

где φ - главный угол реза в плане.

Для определения фактических скорости и глубины резания на рис. 2 представлена расчетная схема. Пунктиром показано положение инструмента в некоторый момент времени. Под фактической скоростью резания условимся понимать произведение фактической угловой скорости на фактический радиус R_{ϕ} - расстояние от вершины реза (точка B) до центра заготовки (точка O), учитывая скорости тангенциальных колебаний реза и заготовки, но пренебрегая эксцентриситетом заготовки и оси вращения. За фак-

тическую глубину примем разницу между радиусом исходной заготовки и фактическим радиусом.

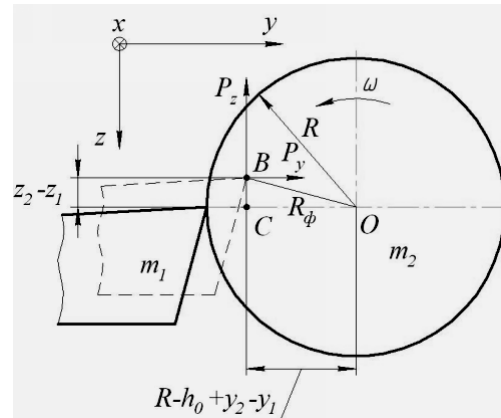


Рис. 2. Расчетная схема к определению фактических скорости и глубины резания (R_ϕ - фактический радиус)

В соответствии с принятыми определениями, фактическая скорость и глубина выражаются следующим образом:

$$V = (\omega + \dot{\psi}_2) \sqrt{(R - h_0 + y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} + \dot{z}_2 - \dot{z}_1, \quad (5)$$

$$h = R - \sqrt{(R - h_0 + y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

где $\dot{\psi}_2$ - угловая скорость крутильных колебаний заготовки.

Крутящий момент тангенциальной и радиальной сил:

$$M_{zy} = P_z R_\phi + P_y (z_2 - z_1), \quad (6)$$

где P_z, P_y определяются формулами (2), куда входят фактические режимы резания, вычисляемые по (4), (5).

Запишем конечное выражение для крутящего момента M_ϕ , развиваемого асинхронным электродвигателем в пределах линейного участка моментной характеристики:

$$M_\phi = \frac{M}{\chi} \left[1 - \frac{\omega + \dot{\psi}_2}{\omega} (1 - \chi) \right]. \quad (7)$$

где M - номинальный крутящий момент, развиваемый двигателем, необходимый для преодоления момента тангенциальной силы резания без учета колебаний, χ - коэффициент скольжения двигателя.

Выражение (7) дает искомую зависимость крутящего момента M_ϕ , развиваемого двигателем при фактической угловой скорости заготовки в условиях номинальных коэффициента скольжения и угловой скорости. В качестве номинальных считаем факторы без учета влияния на них колебаний. Физический смысл полученных выражений состоит в том, что они связывают фактические силовые факторы, действующие в каждый момент времени, с колебательными перемещениями и их скоростями при заданных (номинальных) режимах резания и других параметрах.

Перейдем к решению системы (1). Задачу анализа динамической устойчивости системы сформулируем следующим образом. Для произвольного сочетания входных факторов будем определять наименьшие значения коэффициентов диссипации (вязкого трения), при которых колебания затухают. Для простоты будем полагать их одинаковыми и обозначим b_{\min} . Очевидно, что чем меньше b_{\min} , тем более устойчивой является система. В качестве входных факторов примем режимы резания и будем искать зависимость границы устойчивости, выражающейся в значении b_{\min} , от режимов резания.

Теоретический расчет проведем при следующих исходных данных, рассматривая черновое наружное продольное точение конструкционной стали твердосплавным инструментом. Предел прочности обрабатываемого материала 750 МПа, радиус при вершине реза 1 мм, $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, так что $K_p = 1$. Диаметр заготовки 40 мм. Жесткости: $C_{z1} = C_{y1} = C_{x1} = 10^7$ Н/м, $C_{z2} = C_{y2} = C_{\psi2} = 5 \cdot 10^6$ Н/м. Инерционные характеристики: $m_1 = m_2 = 10$ кг, $J_2 = 10$ кгм². Коэффициент скольжения электродвигателя $\chi = 0,03$. Справочные данные, характеризующие силы резания: $C_{pz} = 300$, $C_{py} = 243$, $C_{px} = 339$, $l_z = -0,15$; $m_z = 0,75$; $n_z = 1$; $l_y = -0,3$; $m_y = 0,6$; $n_y = 0,9$; $l_x = -0,4$; $m_x = 0,5$; $n_x = 1$.

Интервалы изменения входных факторов: $V_0 = (50 \dots 250)$ м/мин с шагом 50, $s_0 = (0,1 \dots 0,9)$ мм/об с шагом 0,2, $h_0 = (0,5 \dots 3,3)$ мм с шагом 0,7. Скорость резания будем изменять посредством изменения угловой скорости при постоянном радиусе заготовки. Частота вращения для заданных значений - от 400 до 2000 об/мин.

Численное решение системы (1) выполним с помощью центрированного метода Эйлера с шагом интегрирования 10^{-5} с при нулевых начальных условиях. Для расчета было разработано собственное программное обеспечение. Расчет произведем для пяти значений каждого фактора, т.е. будем иметь 125 значений b_{\min} . Результаты решения, округленные до 10 Нс/м, приведены в табл. 1.

Простой визуальный анализ дает основание грубо считать, что между b_{\min} и номинальными режимами резания приблизительно наблюдаются пропорциональные связи:

$$b_{\min} \approx 1/V_0, \quad b_{\min} \approx s_0, \quad b_{\min} \approx h_0. \quad (8)$$

Однако практическое значение зависимостей (8), невзирая даже на их приближенный характер, невелико по ряду причин. Во-первых, довольно редко варьируют только одним из режимов, во-вторых, на практике величина диссипации в системе зачастую либо неизвестна, либо ею сложно управлять. Наконец, в-третьих, в производственных условиях наиболее простым и основным способом обеспечения динамической устойчивости является подбор режимов резания. С этой позиции излагается дальнейший материал – установить характер и степень влияния режимов на динамическую устойчивость, которую количественно характеризует параметр b_{\min} .

Предположим, что, какова бы ни была диссипация в системе, подбором соответствующих значений режимов резания можно обеспечить устойчивый режим движения. В этой связи знать точную величину критической диссипации нет необходимости – нужно знать, как управлять режимами резания для обеспечения динамической устойчивости.

Таблица 1. Результаты расчета минимального коэффициента вязкого трения, при котором колебания затухают, в зависимости от режимов резания

b_{\min} , Нс/м, в зависимости от номинальных скорости резания и подачи					
при глубине резания					
$h_0 = 0,5$ мм					
Скорость резания V_0 , м/мин	Подача s_0 , мм/об				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
50	80	160	220	280	330
100	40	70	100	130	150
150	30	50	70	80	90
200	20	40	50	60	70
250	10	20	30	40	50
$h_0 = 1,2$ мм					
50	150	410	580	720	840
100	80	190	270	330	390
150	50	120	170	210	250
200	40	90	120	150	180
250	30	70	100	120	140
$h_0 = 1,9$ мм					
50	210	610	930	1200	1440
100	110	290	430	550	650
150	80	190	280	350	410
200	60	140	200	260	300
250	50	110	160	200	230
$h_0 = 2,6$ мм					
50	270	750	1200	1730	2450
100	130	370	580	770	920
150	100	260	390	490	590
200	80	190	280	360	430
250	60	150	220	280	340
$h_0 = 3,3$ мм					
50	330	870	1540	2740	4260
100	170	460	740	980	1210
150	130	320	490	640	760
200	110	240	360	470	560
250	90	200	290	370	440

С этой целью проведем двухфакторный регрессионный анализ полученных результатов при фиксированном значении третьего. Возможны три двухфакторных сочетания. Методом наименьших квадратов найдем функции отклика. В качестве таких функций примем простые функции не выше второй степени (по модулю) относительно исследуемых факторов. В основе поиска этих функций лежит следующая основная идея: с их помощью определить вклад каждого фактора в формирование значения b_{\min} (табл. 1), т.е. вклад в устойчивость.

Расчетный метод поясним на следующем примере. Пусть требуется определить вклад факторов x , y и их сочетания в точке $(1;1)$ для функции $f = 5x - 3y + 2xy$. Очевидно, что в этой точке $f = 4$ и x -член превышает значение самой функции. Этот недостаток устраняется, если вместо алгебраической взять арифметическую сумму всех входящих в функцию f членов. Тогда $f = 10$, в котором x -член составляет 5, y -член равен 3, а xy -член равен 2, т.е. вклад фактора x - 0,5; фактора y - 0,3; совместный вклад факторов x и y - 0,2. Таким образом, в качестве количественной оценки «вклада» фактора будем считать отношение арифметической суммы всех членов, содержащих только этот фактор, к арифметической сумме вообще всех членов уравнения, усредненное по всем расчетным точкам. Указанный формальный арифметический прием имеет искусственный характер, но он позволяет хотя бы приближенно оценить процентное влияние каждого фактора и их сочетаний, которое из уравнения регрессии не следует напрямую, в том числе из коэффициентов уравнения, стоящих перед членами разной природы и потому несравнимых.

Опустим расчетную сторону работы и зададимся вопросом, насколько точны результаты двухфакторного регрессионного анализа. Точность приближения расчетных данных, полученных при решении системы (1), будем характеризовать погрешностью приближения, за которую примем среднюю по всем точкам относительную погрешность между исходным значением b_{\min} и получающимся из уравнения регрессии. Помимо этой погрешности, имеет место погрешность, вызванная видом функции. Для функции другого вида, пусть с той же погрешностью приближения, соотношение влияния факторов может быть несколько иным. Также имеет место погрешность округления параметра b_{\min} . Таковы основные погрешности самого расчета, не считая погрешности собственно математической модели.

В табл. 2 приведены результаты регрессионного анализа: приближающая функция, погрешность приближения и вклад факторов в процентах, округленный сообразно погрешности приближения, но не менее чем до 10%. Результаты анализа позволяют сделать несколько выводов.

1. Самостоятельное влияние режимов незначительно. Так, влиянием глубины можно вовсе пренебречь, особенно при постоянной скорости. Подача влияет несколько больше: от 10% до 40% при постоянной глубине, однако не более 20% при постоянной скорости. Наибольшее самостоятельно влияние имеет скорость резания: от 10% до 40% при постоянной глубине и от 30% до 50% при постоянной подаче.

2. Во всех трех случаях наибольшее влияние имеет совместное изменение режимов: (40...60)% при постоянной глубине, (40...70)% при постоянной подаче, (80...100)% при постоянной скорости. По этой причине наиболее эффективным способом обеспечения динамической устойчивости представляется управление не одним, а двумя режимами резания, что практически обычно и применяется.

3. Первые два вывода косвенно отражены в третьей части таблицы 2. Зафиксировав скорость резания, как наиболее влиятельный из режимов, другие два режима «поодиночке» почти не оказывают воздействия на устойчивость. Поэтому, если скорость задана какими-либо условиями, то для обеспечения динамической устойчивости необходимо изменять одновременно подачу и глубину.

Отметим, что влияние режимов резания логически не противоречит знакам их показателей степени в формулах сил резания.

Таблица 2. Результаты двухфакторного регрессионного анализа при фиксированном значении третьего

Фиксированный фактор	Уравнение регрессии	Погрешность приближения, %	Вклад факторов или их сочетания, %		
			V	s	V, s
h , мм			V	s	V, s
0,5	$-5 + \frac{2,40 \cdot 10^3}{V} + \frac{2,32 \cdot 10^4}{V^2} + 21s - 46s^2 + 1,66 \cdot 10^4 \frac{s}{V}$	8	20	20	60
1,2	$-20 + \frac{2,53 \cdot 10^3}{V} + \frac{1,35 \cdot 10^5}{V^2} + 158s - 211s^2 + 4,46 \cdot 10^4 \frac{s}{V}$	7	10	40	50
1,9	$1 - \frac{2,14 \cdot 10^3}{V} + \frac{2,83 \cdot 10^5}{V^2} + 173s - 293s^2 + 8,16 \cdot 10^4 \frac{s}{V}$	5	10	30	60
2,6	$193 - \frac{2,92 \cdot 10^4}{V} + \frac{9,20 \cdot 10^5}{V^2} - 355s - 18s^2 + 1,47 \cdot 10^5 \frac{s}{V}$	10	30	10	60
3,3	$322 - \frac{4,76 \cdot 10^4}{V} - 281s + 8,06 \cdot 10^4 \frac{s}{V}$	21	40	20	40
s , мм/об			V	h	V, h
0,1	$-6 + \frac{1,87 \cdot 10^3}{V} + \frac{2,89 \cdot 10^4}{V^2} + 9h + 0,3h^2 + 3,82 \cdot 10^3 \frac{h}{V}$	6	50	10	40
0,3	$-31 + \frac{5,52 \cdot 10^3}{V} + 16h + 1,19 \cdot 10^4 \frac{h}{V}$	6	40	10	50
0,5	$-10 - \frac{2,70 \cdot 10^3}{V} + \frac{1,64 \cdot 10^5}{V^2} + 9h - 4h^2 + 2,35 \cdot 10^4 \frac{h}{V}$	3	30	0	70
0,7	$76 - \frac{1,65 \cdot 10^4}{V} - 98h + 4,61 \cdot 10^4 \frac{h}{V}$	11	40	10	50
0,9	$231 - \frac{4,39 \cdot 10^5}{V} - 247h + 7,71 \cdot 10^4 \frac{h}{V}$	23	40	20	40
V , м/мин			h	s	h, s
50	$292 - 180h - 925s + 1562hs$	26	0	25	75
100	$39 + 9h - 99s + 419hs$	8	0	0	100
150	$19 + 17h - 61s + 256hs$	8	0	10	90
200	$10 + 16h - 40s + 182hs$	8	0	10	90
250	$-1 + 18h - 28s + 140hs$	7	0	20	80

Примечание. V, s, h - номинальные режимы резания

Так, скорость резания имеет отрицательный показатель степени, а ее увеличение приводит к снижению силы резания и повышению устойчивости. Подача и глубина

имеют положительные показатели степени, и их увеличение приводит к росту сил резания и снижению устойчивости.

Однако между величиной этих показателей и влиянием соответствующего режима резания наблюдается видимое несоответствие. Средние значения показателей степени: +0,95 при глубине; +0,6 при подаче; -0,3 при скорости. Но глубина практически не оказывает самостоятельного влияния на устойчивость (в среднем менее 10%), подача имеет чуть большее влияние (менее 20%), а скорость – максимальное (30%). Примерно в этой же пропорции, только в обратном порядке, соотносятся абсолютные значения их показателей степени. Этот результат оставим без объяснений.

Результаты проведенного анализа и сделанные из него выводы не бесспорны, даже если считать, что реальная ДС точно описывается системой (1). Это попытка более полного использования известных эмпирических зависимостей для расчета сил резания, в которых в известной мере «изначально содержатся» полученные результаты. То есть достоверность разработанной математической модели не выше достоверности этих эмпирических формул. Но поскольку они используются при расчетах, естественно использовать более полно содержащуюся в них «дополнительную информацию», к которой мы относим полученные сведения об устойчивости ДС.

Сравним полученные результаты с экспериментальными данными других авторов. Здесь можно отметить несколько расхождений. По данным [6], при черновой обработке увеличение подачи повышает устойчивость, чему не соответствуют полученные результаты. Далее, увеличение скорости резания до некоторого значения приводит к росту амплитуд, после чего дальнейшее повышение скорости ведет к их уменьшению [1, 4, 5]. Оценивая устойчивость амплитудами, также отметим несоответствие: полученные данные говорят о монотонном влиянии скорости на устойчивость – увеличение скорости повышает устойчивость. Это расхождение можно объяснить тем, что в формуле (2) не учитывается наличие максимума силы резания при некоторой скорости и рассматривается только ниспадающий участок зависимости «сила-скорость», характеризующий отрицательным показателем степени.

К согласующимся с опытом результатам можно отнести следующие. Увеличение глубины и подачи, исключая весьма малые значения, приводит к снижению максимально допустимой скорости резания [13]. В табл. 1 это выражается тем, что с увеличением глубины и подачи при постоянной скорости устойчивость снижается, т.е. для обеспечения устойчивости скорость следует уменьшать. Также не противоречит экспериментальным данным то, что увеличение глубины снижает устойчивость [4-6].

Из практики предполагается также, что переменные силы, возбуждающие колебания при точении, действуют в основном в радиальном направлении [1, 4, 5]. В данном случае, если продифференцировать зависимости составляющих сил резания, то из всех частных производных по координатам от силовых факторов в правой части (1) [с учетом (4), (5)] производные по координате y наибольшие. Так как по физическому смыслу частные производные суть приращения сил резания при приращении соответствующих координат («жесткости» процесса резания в разных направлениях), то получается, что именно перемещения в радиальном направлении вызывает наибольшие изменения сил. Этот результат не совсем точно отражает указанный экспериментальный факт, однако логически не противоречит ему.

Опуская за краткостью подробные результаты, отметим также, что тангенциальные перемещения практически не влияют на изменение сил резания, что согласуется с опытными данными [1, 5].

3. Заключение

1. Исходя из эмпирических зависимостей для расчета сил резания, наибольшее самостоятельное влияние на устойчивость при точении имеет скорость резания, наименьшее – глубина.

2. Совместное изменение режимов влияет на устойчивость гораздо сильнее, чем одиночное, более чем на 50% определяя значение показателя устойчивости. Поэтому для обеспечения устойчивости следует варьировать по крайней мере двумя режимами.

Список литературы: 1. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металла / А.И. Каширин. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. – 133 с. 2. Кудинов В.А. Общность задач устойчивости движения в станках и других механических системах / В.А. Кудинов // Исслед. колебаний металлорежущих станков при резании металлов: сб. – М.: Машгиз, 1958. - С. 29 - 36. 3. Эльясберг М.Е. Об устойчивости процесса резания металлов / М.Е. Эльясберг // Изв. АН СССР. – 1958. – № 9. – С. 37 – 58. 4. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А.П. Соколовский // Исслед. колебаний металлорежущих станков при резании металлов : сб. тр. – М. : Машгиз, 1958. – 120 с. 5. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – М.-Свердловск: Машгиз, 1958. – 144 с. 6. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с. 7. Орликов М.Л. Динамика станков: учебное пособие / М.Л. Орликов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., 1989. – 268 с. 8. Оборский Г.А. Методы управления надежностью технологических систем по параметру «динамическая устойчивость» / Г.А. Оборский // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. Харк. держ. політехн. ун-та. – Х., 2002. - Вип. 1 (6). - С. 288 - 292. 9. 192. Оборский Г.А. Влияние теплофизических явлений на динамическую устойчивость процесса резания / Г.А. Оборский, А.В. Усов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: наук. журн. Запоріж. нац. техн. ун-ту. – Запоріжжя, 2003. – Вип. 1. – С. 58 – 60. 10. Кабалдин Ю.Г. Математическое моделирование динамической устойчивости системы резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, П.А. Саблин // Вестн. машиностроения. - 2006. - № 10. - С. 35 – 43. 11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с. 12. Никитин Б.В. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков / Б.В. Никитин. – М.: Машгиз, 1962. – 112 с. 13. Жесткость, точность и вибрации при механической обработке / под ред. В.А. Скрагана. - М.-Л.: Машгиз, 1956. - 194 с.

Надійшла до редколегії 22.01.10 р.

THEORETICAL ANALYSIS OF DYNAMIC STABILITY IN TURNING

Chernyshev E.A., Volosenko K.S.

The paper presents theoretical analysis of dynamic stability in turning. On the base of engineering empirical relationships for calculating cutting forces there have been proposed the new approach and defined influence of cutting regimes on dynamic stability.

Key words: *dynamic stability, cutting regimes, dissipation.*

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ СТАЛОСТІ ПРИ ТОЧІННІ

Чернишев Є.О., Волосенко К.С.

Анотація. У статті виконано теоретичний аналіз динамічної сталості при точінні. На підставі емпіричних залежностей для розрахунку сил різання запропоновано новий підхід і встановлено вплив режимів різання на динамічну сталість.

Ключові слова: *динамічна сталість, режими різання, дисипація.*